

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-082045

(43)Date of publication of application : 22.03.2002

(51)Int.CI. G01N 21/17
A61B 10/00
G01B 9/02
G01B 11/00

(21)Application number : 2000-274123

(71)Applicant : JAPAN SCIENCE & TECHNOLOGY CORP

(22)Date of filing : 08.09.2000

(72)Inventor : KOROGI MOTONOBU

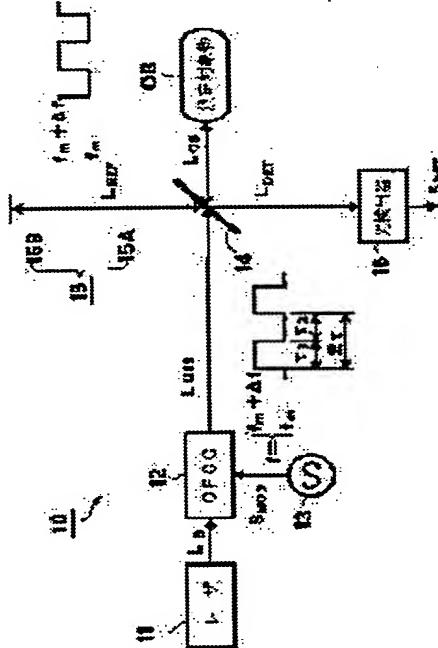
NAKAMOTO OSAMU
BANBAN WIDEIYATTOMOKO

(54) PHOTOMETRIC SYSTEM

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To stably take measurements with spatially high resolution in a short time by means of a simple arrangement using one frequency COM generator.

SOLUTION: This system comprises a source 11 of laser beams serving as a light source which emits a coherent light beam L0; a light frequency COM generator 12 on which the laser beam L0 impinges from the source 11; a modulation signal generator 13 for generating a modulation signal SMOD imparted to the light frequency COM generator 12; a light separator and synthesizer 14 for separating and synthesizing a reference light beam LREF from and with an object light beam LOB; a light delay path 15 providing a delay of a predetermined time τ to the reference light beam LREF separated from the object light beam by the light separator and synthesizer 14; and a photodetector 16 for detecting changes in intensity of light caused by interference between the reference light beam LREF and the object light beam LOB synthesized with each other by the light separator and synthesizer 14.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 14.02.2002

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision
of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2002-82045

(P2002-82045A)

(43)公開日 平成14年3月22日(2002.3.22)

(51)Int.Cl.⁷
G 0 1 N 21/17
A 6 1 B 10/00
G 0 1 B 9/02
11/00

識別記号
6 3 0

F I
G 0 1 N 21/17
A 6 1 B 10/00
G 0 1 B 9/02
11/00

テマコト[®](参考)
6 3 0 2 F 0 6 4
E 2 F 0 6 5
2 G 0 5 9
G

審査請求 未請求 請求項の数 6 ○L (全 15 頁)

(21)出願番号 特願2000-274123(P2000-274123)

(22)出願日 平成12年9月8日(2000.9.8)

(71)出願人 396020800
科学技術振興事業団
埼玉県川口市本町4丁目1番8号

(72)発明者 舟木 元伸
神奈川県横浜市旭区若葉台4-28-905

(72)発明者 仲本 修
東京都大田区蒲田3-3-4

(72)発明者 パンパン ウィディヤットモコ
神奈川県横浜市緑区長津田町3034-3

(74)代理人 100067736
弁理士 小池 晃 (外2名)

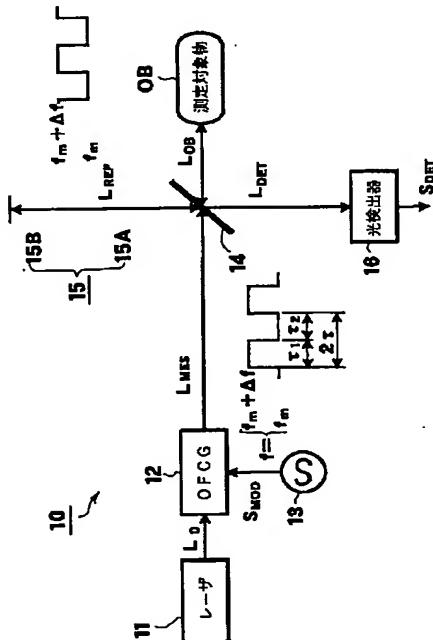
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 光計測システム

(57)【要約】

【課題】 1台の周波数コム発生器を用いた簡単な構成で短時間に且つ安定に空間的高分解能な測定を行う。

【解決手段】 可干涉性を有する光L_oを出射する光源であるレーザ光源1 1と、このレーザ光源1 1からレーザ光L_oが入射される光周波数コム発生器1 2と、この光周波数コム発生器1 2に与える変調信号S_{mod}を発生する変調信号発生器1 3と、参照光L_{REF}と物体光L_{ob}の分離・合成を行う光分離・合成器1 4と、上記光分離・合成器1 4により分離された参照光L_{REF}に所定時間τの遅延を与える光遅延路1 5と、上記光分離・合成器1 4により合成された参照光L_{REF}と物体光L_{ob}との干渉による光強度の変化を検出する光検出器1 6とからなる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 可干渉性を有する光を出射する光源と、第1の期間 τ_1 には第1の周波数 f_0 で第2の期間 τ_2 には第2の周波数 $f_0 + \Delta f$ の変調信号を所定の繰り返し周期で生成する変調信号生成手段と、上記変調信号生成手段からの変調信号により上記光源からの入射光を変調して、入射光の周波数を中心周波数とし、上記第1の期間 τ_1 には第1の周波数 f_0 間隔毎に側帯波を有し、第2の期間 τ_2 には第2の周波数 $f_0 + \Delta f$ 間隔毎に側帯波を有する計測光を生成する光周波数コム発生手段と、上記光周波数コム発生手段からの計測光を参照光と物体光に分離する光分離手段と、上記光分離手段により分離された参照光又は物体光の一方に所定時間の遅延を与える光遅延手段と、上記物体光の測定対象物による反射光又は透過光と上記参照光とを合成する光合成手段と、上記光合成手段により合成された上記参照光と物体光との干渉による光強度の変化を検出する検出手段とを備えることを特徴とする光計測システム。

【請求項2】 上記光遅延手段は光ファイバーからなることを特徴とする請求項1記載の光計測システム。

【請求項3】 上記光周波数コム発生器により生成された計測光を、光増幅手段により非線形性を発生する程度まで増幅して、スーパーコンティニュームファイバーを介して上記光分離手段に入射させるようにしたことを特徴とする請求項1記載の光計測システム。

【請求項4】 可干渉性を有する光を出射する光源と、第1の期間 τ_1 には第1の周波数 f_0 で第2の期間 τ_2 には第2の周波数 $f_0 + \Delta f$ の変調信号を所定の繰り返し周期で生成する変調信号生成手段と、上記変調信号生成手段からの変調信号により上記光源からの入射光を変調して、入射光の周波数を中心周波数とし、上記第1の期間 τ_1 には第1の周波数 f_0 間隔毎に側帯波を有し、第2の期間 τ_2 には第2の周波数 $f_0 + \Delta f$ 間隔毎に側帯波を有する計測光を生成する光周波数コム発生手段と、上記光周波数コム発生手段からの計測光を参照光と物体光に分離する光分離手段と、上記光分離手段により分離された参照光又は物体光の一方に所定時間の遅延を与える光遅延手段と、上記光分離手段により分離された物体光の照射位置を測定対象物上で走査する走査手段と、上記測定対象物により反射された物体光と上記参照光とを合成する光合成手段と、上記光合成手段により合成された上記参照光と物体光との干渉による光強度の変化を検出する検出手段と、上記検出手段からの干渉検出結果に基づいて、測定対象物の形状情報を検出する形状検出手段と、上記走査手段で走査されることで、上記形状検出手段で

生成された複数の形状情報を用いて、測定対象物の形状を示す画像を生成する画像生成手段とを備えることを特徴とする光計測システム。

【請求項5】 上記光遅延手段は光ファイバーからなることを特徴とする請求項4記載の光計測システム。

【請求項6】 上記光周波数コム発生器により生成された計測光を、光増幅手段により非線形性を発生する程度まで増幅して、スーパーコンティニュームファイバーを介して上記光分離手段に入射させるようにしたことを特徴とする請求項5記載の光計測システム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、任意の波長における広いスペクトル幅を必要とする光計測システムに関し、特に高速且つ高分解能な測定を実現するための光計測システムに関する。

【0002】

【従来の技術】従来、空間的高分解能な測定を実現するための光計測システムとして、光コヒーレントトモグラフィー(OCT:Optical Coherence Tomography)装置に代表される任意の波長域における広いスペクトル幅を必要とする光計測システムが知られている。

【0003】上記OCT装置としては、例えば図13に示すようなものがある。このOCT装置は、可干渉距離が短い光源L1101から出射した光L1102と参照光L1103とに分割する。物体光L1102は、スキャナ1103を介して測定試料Sで反射されて物体光L1104とされ再びビームスプリッタ1102に入射される。また、参照光L1103は、周波数シフタ1104を介してモータ1106で位置決めされた参照光用ミラー1105で反射されて再びビームスプリッタ1102に入射される。

【0004】物体光L1104と参照光L1103とは、ビームスプリッタ1102に入射されることで合成され、干渉光L1105として光検出器1107に入射される。光検出器1107では、物体光L1104と参照光L1103との干渉により光強度が変調された干渉光を検出して検出信号を生成する。検出信号は信号処理回路1108で例えばフィルタリング、A/D変換されて制御部1109に入力される。制御部1109では、入力された信号に基づいて、例えば測定試料Sの内部構造を示す画像を測定結果として生成する。また、制御部1109では、入力された信号やモータ1106からのフィードバック信号に基づいてモータ駆動回路1110を制御してモータ1106を駆動する。また、制御部1109では、測定試料Sの表面上で物体光L1102を走査させるようにスキャナ1103を制御する。

【0005】このような構成のOCT装置1000では、測定試料SをZ方向又は参照用ミラー1105をX

方向に移動させて、測定試料S又は参照用ミラー1105が移動した距離を求ることにより、測定試料Sの深さ方向における反射率分布を得る。これにより、OCT装置1000は、深さ方向における反射率分布を得ることで、測定試料Sの断層計測を行って測定試料Sの内部形状及び外部形状を測定することができる。このOCT装置1000では、例えば赤色～近赤外の波長領域の光を用いることにより、生体内部の観測に用いることができる。

【0006】また、従来のOCT装置1000において、可干渉距離の短い光源1101としてパルスレーザを出射したときには、参照用ミラー1105で反射するパルスのタイミングが合うことにより干渉が発生した成分を用いて測定試料Sの内部構造を観測することもできる。

【0007】このようにOCT装置1000では、物体の内部構造、屈折率や厚さ等、空間的高分解能な測定を実現することができる。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】しかし、OCT装置では、測定対象の表面形状や深さ方向の情報を得るために機械的な参照光の遅延距離を変調することを必要としたために、測定に多大な時間がかかるという不具合があった。

【0009】すなわち、従来のOCT装置1000では、通常、光源1101が単一であるために、参照用ミラー1105のX方向における位置を機械的に制御して干渉を制御しなければならなかった。ここで、参照用ミラー1105の動作速度には限界があり、従来のOCT装置1000では、測定試料Sを測定するのに多大な時間を要することが多かった。

【0010】更に、従来において、光周波数変調干渉法(Optical Frequency Domain Reflectometry: OFDR)と称される手法を適用したトモグラフィー装置が提案されているが、現実には使用するレーザの周波数を広範囲に掃引する必要があり、このときに機械的駆動が用いられている。

【0011】そこで、本発明は、上述したような実情に鑑みて提案されたものであり、1台の周波数コム発生器を用いた簡単な構成で短時間に且つ安定に空間的高分解能な測定を行うことができる光計測システムを提供することを目的とする。

【0012】

【課題を解決するための手段】本発明に係る光計測システムは、可干渉性を有する光を出射する光源と、第1の期間 τ_1 には第1の周波数 f_1 で第2の期間 τ_2 には第2の周波数 $f_2 + \Delta f$ の変調信号を所定の繰り返し周期で生成する変調信号生成手段と、上記変調信号生成手段からの変調信号により上記光源からの入射光を変調して、入射光の周波数を中心周波数とし、上記第1の期間 τ_1 には第1の周波数 f_1 間隔毎に側帯波を有し、第2の期間 τ_2 には第2の周波数 $f_2 + \Delta f$ 間隔毎に側帯波を有する計測光を生成する光周波数コム発生手段と、上記光周波数コム発生手段からの計測光を参照光と物体光に分離する光分離手段と、上記光分離手段により分離された参照光又は物体光の一方に所定時間の遅延を与える光遅延手段と、上記物体光の測定対象物による反射光又は透過光と上記参照光とを合成する光合成手段と、上記光合成手段により合成された上記参照光と物体光との干渉による光強度の変化を検出する検出手段とを備えることを特徴とする。

【0013】また、本発明に係る光計測システムは、可干渉性を有する光を出射する光源と、第1の期間 τ_1 には第1の周波数 f_1 で第2の期間 τ_2 には第2の周波数 $f_2 + \Delta f$ の変調信号を所定の繰り返し周期で生成する変調信号生成手段と、上記変調信号生成手段からの変調信号により上記光源からの入射光を変調して、入射光の周波数を中心周波数とし、上記第1の期間 τ_1 には第1の周波数 f_1 間隔毎に側帯波を有し、第2の期間 τ_2 には第2の周波数 $f_2 + \Delta f$ 間隔毎に側帯波を有する計測光を生成する光周波数コム発生手段と、上記光周波数コム発生手段からの計測光を参照光と物体光に分離する光分離手段と、上記光分離手段により分離された参照光又は物体光の一方に所定時間の遅延を与える光遅延手段と、上記光分離手段により分離された物体光の照射位置を測定対象物上で走査する走査手段と、上記測定対象物により反射された物体光と上記参照光とを合成する光合成手段と、上記光合成手段により合成された上記参照光と物体光との干渉による光強度の変化を検出する検出手段と、上記検出手段からの干渉検出結果に基づいて、測定対象物の形状情報を検出する形状検出手段と、上記走査手段で走査されることで、上記形状検出手段で生成された複数の形状情報を用いて、測定対象物の形状を示す画像を生成する画像生成手段とを備えることを特徴とする。

【0014】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態について図面を参照しながら詳細に説明する。

【0015】本発明に係る光計測システムでは、例えば図1に示すように原理的に1個の光周波数コム発生器(Optical Frequency Comb Generator)を用いて、光コヒーレントトモグラフィー(OCT:Optical Coherence Tomography)装置10を構成する。

【0016】このOCT装置10は、その原理的な構成を図1に示すように、可干渉性を有する光L₁を出射する光源であるレーザ光源11と、このレーザ光源11からレーザ光L₁が入射される光周波数コム発生器12と、この光周波数コム発生器12に与える変調信号S_{mod}を発生する変調信号発生器13と、参照光L_{REF}と物体光L_{obj}の分離・合成を行う光分離・合成器14と、

上記光分離・合成器14により分離された参照光 L_{REF} に所定時間 τ の遅延を与える光遅延路15と、上記光分離・合成器14により合成された参照光 L_{REF} と物体光 L_{OB} との干渉による光強度の変化を検出する光検出器16とからなる。このOCT装置10において、レーザ光源11は、可干渉性を有し所定の周波数のレーザ光 L_L を発生する。このレーザ光源11により発生されたレーザ光 L_L は、光周波数コム発生器12に入射される。

【0017】光周波数コム発生器12は、上記レーザ光源11により発生されたレーザ光 L_L を変調信号発生器13により与えられる変調信号 S_{MOD} で変調することにより、上記レーザ光 L_L の周波数を中心周波数とし、上記変調信号 S_{MOD} の周波数間隔毎に側帯波（サイドバンド）を有する計測光 L_{MES} を生成する。この光周波数コム発生器12は、例えばEOM（電気光学変調器）と当該EOMを挟むように対向して配設された反射鏡とからなり、EOMと反射鏡で光発振器を構成してなる。

【0018】変調信号発生器13は、第1の期間 τ_1 には第1の周波数 f_1 で第2の期間 τ_2 には第2の周波数 $f_2 + \Delta f$ の変調信号 S_{MOD} を所定の繰り返し周期で発生する。ここでは $\tau_1 = \tau_2 = \tau$ とし、 2τ の繰り返し周期で第1の周波数 f_1 と第2の周波数 $f_2 + \Delta f$ の変調信号 S_{MOD} を上記変調信号発生器13は発生するものとする。

【0019】この変調信号発生器13により発生された変調信号 S_{MOD} が与えられる上記光周波数コム発生器12では、第1の周波数 f_1 の変調信号 S_{MOD} が与えられる第1の期間 τ_1 には、レーザ光 L_L の周波数を中心周波数 ν として、第1の周波数 f_1 の等周波数間隔で側帯波を発生させ、中心周波数 ν から $k f_1$ （ $k = -m, -m+1, -m+2, \dots, 0, 1, 2, \dots, n$ ）の周波数成分の側帯波を有する計測光 L_{MES} を生成し、また、第2の周波数 $f_2 + \Delta f$ の変調信号 S_{MOD} が与えられる第2の期間 τ_2 には、レーザ光 L_L の周波数を中心周波数 ν として、第2の周波数 $f_2 + \Delta f$ の等周波数間隔で側帯波を発生させ、中心周波数 ν から $k (f_2 + \Delta f)$ （ $k = -m, -m+1, -m+2, \dots, 0, 1, 2, \dots, n$ ）の周波数成分の側帯波を有する計測光 L_{MES} を生成する。この光周波数コム発生器12により生成された計測光 L_{MES} は、光分離・合成器14に入射される。

【0020】光分離・合成器14は、例えばハーフミラーにより構成され、上記光周波数コム発生器12により生成された計測光 L_{MES} を参照光 L_{REF} と物体光 L_{OB} に分離する。この光分離・合成器14により分離された参照光 L_{REF} は、光遅延路15により所定時間の遅延を与えられて、当該光分離・合成器14に再度入射される。また、この光分離・合成器14により分離された物体光 L_{OB} は、測定対象物OBに照射され、その反射光が当該光分離・合成器14に再度入射される。そして、この光

分離・合成器14は、上記光遅延路15により所定時間の遅延を与えられた参照光 L_{REF} と測定対象物OBで反射された物体光 L_{OB} を合成した干渉光 L_{DET} を光検出器16に出射する。

【0021】ここで、上記光遅延路15は、上記変調信号発生器13で発生される変調信号 S_{MOD} の繰り返し周期 2τ の半分の時間に等しいて時間の遅延を上記光分離・合成器14により分離された参照光 L_{REF} に与える。この光遅延路15は、例えば終端が全反射ミラー15Bとされ片道で $\tau/2$ 時間の遅延量を与える長さの光ファイバー15Aにより構成される。

【0022】このような構成の光計測システムでは、上記変調信号発生器13で発生される変調信号 S_{MOD} の繰り返し周期 2τ の半分の時間に等しいて時間の遅延を上記光分離・合成器14により分離された参照光 L_{REF} に与えることにより、上記光分離・合成器14において、物体光 L_{OB} が第1の周波数 f_1 で変調されている第1の期間 τ_1 には、上記第1の周波数 f_1 で変調された物体光 L_{OB} が第2の周波数 $f_2 + \Delta f$ で変調された参照光 L_{REF} と合成され、また、物体光 L_{OB} が第2の周波数 $f_2 + \Delta f$ で変調されている第2の期間 τ_2 には、上記第2の周波数 $f_2 + \Delta f$ で変調された物体光 L_{OB} が第1の周波数 f_1 で変調された参照光 L_{REF} と合成されることになる。

【0023】ここでは $\tau_1 = \tau_2 = \tau$ とし、 2τ の繰り返し周期で第1の周波数 f_1 と第2の周波数 $f_2 + \Delta f$ の変調信号 S_{MOD} を上記変調信号発生器13は発生するものとし、上記変調信号発生器13で発生される変調信号 S_{MOD} の繰り返し周期 2τ の半分の時間に等しいて時間の遅延を上記光分離・合成器14により分離された参照光 L_{REF} に与えることにより、図2に示すように、上記光分離・合成器14において、上記第1の期間 τ_1 及び第2の期間 τ_2 の全期間で変調周波数が Δf だけ異なる物体光 L_{OB} と参照光 L_{REF} とを合成した干渉光 L_{DET} を得ることができる。なお、上記光検出器16による第1の期間 τ_1 における干渉光 L_{DET} の検出出力と第2の期間 τ_2 における干渉光 L_{DET} の検出出力は、それぞれ互いの時間反転信号となる。また、上記参照光 L_{REF} に与える遅延は τ 時間でなくても、物体光 L_{OB} と参照光 L_{REF} の変調周波数が Δf だけ異なる条件を満たしている期間に光 L_{DET} を得ることができる。

【0024】なお、2個の光周波数コム発生器を用いて、変調周波数が Δf だけ異なる物体光 L_{OB} と参照光 L_{REF} とを個別に発生することも可能であるが、各光周波数コム発生器の温度特性などを厳密に管理するなどの必要があるに対し、本願発明では、このように1個の光周波数コム発生器により生成される計測光 L_{MES} を参照光 L_{REF} と物体光 L_{OB} に分離して用いることによって、1台の周波数コム発生器を用いた簡単な構成で短時間に且つ安定に測定を行うことが可能な光計測システムを実現

することができる。

【0025】ここでOCTの原理によれば分解能は使用する光源のスペクトル幅で決まる。これは光周波数コムの場合も同じであり、光周波数コムのスペクトルを広げることで分解能が改善される。そこで、本発明では、上記光周波数コム発生器12により生成された計測光L_{MES}を図3に示すように光アンプ17で非線形性を発生する程度まで増幅し、SCファイバー18を介して上記光分離・合成器14に入射させるようとする。SCファイバー18とはスーパー・コンティニューム・ファイバの略で例えば分散の小さい自己位相変調を引き起こしやすいファイバである。これにより時間軸の関数ではパルスであるコムは自己位相変調により、スペクトルは拡大し、分解能は高まる。

【0026】ただし、この場合参照光L_{REF}が遅延して光検出器16に入る間に分散性媒質を通らないことが必要であり、光ファイバー等で遅延を行つ場合には補償する必要がある。この解決方法には2つの方法がある。一つの方法は分散補償可能なデバイス、例えば分散補償ファイバーを用いて補償を行う。もう一つの方法は信号処理の過程で、例えばデジタル信号処理又はアナログ信号処理によって補償を行う。次に説明するOCT装置の実施例ではこの両者の方法を共に含んでいるが、片方の方法だけでもよい。

【0027】図4は、本発明を適用したOCT装置100の実施例を示している。

【0028】このOCT装置100は、計測光生成部110、計測光注入部120、測定部130、信号処理部140及び制御部150からなる。

【0029】上記計測光生成部110は、可干渉性を有する光を出射する光源であるレーザ光源111と、このレーザ光源111からレーザ光L₀が入射される光周波数コム発生器112と、この光周波数コム発生器112に変調信号を与える変調信号発生部113とからなる。

【0030】レーザ光源111は、単一モードCWレーザであり温度制御等で安定化されている。光周波数コム発生器112は、ファイバー入力、ファイバー出力となっており、位相変調器を2枚の鏡で構成される光共振器の中に入れることで構成されている。この光周波数コム発生器112には、光共振器の自由スペクトル域の整数倍の周波数f₀を有する変調信号S_{MOD}が変調信号発生部113により与えられる。

【0031】この光周波数コム発生器112は、レーザ光源111からのレーザ光L₀を上記変調信号S_{MOD}で変調することによって計測光L_{MES}として光周波数コムを生成するが、変調周波数が少し変動しても光周波数コムすなわち計測光L_{MES}の出力が可能である。なお、計測光生成部110は、光周波数コム発生器でなくても、結果として光周波数コムと同等なキャリア周波数と繰り返し周波数を同等に制御できる同様な出力特性を持つ光

源であれば、それを用いるようにしてもよい。

【0032】上記変調信号発生部113は、周波数がf₀のマイクロ波信号を発振するマイクロ波発振器113Aと、このマイクロ波発振器113Aの発振出力を位相変調する位相シフタ113Bと、この位相シフタ113Bに位相制御信号を与える位相制御信号発生器113Cからなる。

【0033】位相制御信号発生器113Cは、制御部150のシステムコントローラ151により制御され、例えば図5の(A)に示すように、位相の最大値と最小値の差が△φ_{..}を中心として△φ_{..}/2πの幅の鋸歯状波状に上記マイクロ波信号の位相を変化させる位相制御信号を上記位相シフタ113Bに与える。上記位相シフタ113Bを介して光周波数コム発生器112に入力される変調信号は、図5の(B)に示すように周波数f₀を中心にして△φ_{..}/2πの周波数変調された変調信号S_{MOD}となる。

【0034】なお、上記制御部150のシステムコントローラ151は、上記鋸歯状波状の位相制御信号の傾きが正から負へ、又は負から正へ変化するタイミングを用いて干渉信号をデータとして取り込む時のトリガーとする。

【0035】これにより、後述するように物体光L_oと参照光L_{REF}がτの時間差を持って光検出器135に到達したとすると、その時点では図5(C)に示すように相対的に周波数差は△φ_{..}に比例し、△φ_{..}/2πの(πτ)[Hz]になる。ここで図1と比較すると△φ_{..}/2πが△fに対応し、f₀-△φ_{..}/2πがf₀に対応している。

【0036】干渉信号S_{DET}が連続的に測定できる深さは、鋸歯状波によって変動する位相の大きさに比例し、本装置では最大c△φ_{..}/2πn_{refr}πf₀の深さまで連続的に観測できる。これは例えば図5に示す時刻Aから時刻Bの時間まで測定したとした時の観測できる範囲である。ここでcは光速、n_{refr}は対象の屈折率である。例えば△φ_{..}=π、f₀=6GHz、n_{refr}=1.5である場合1.7cmの深さまで干渉信号S_{DET}が測定できる。図5(C)に示す信号例のように時刻Bから時刻Cの時間では時刻Aから時刻Bまで測定したとした時の信号の時間反転の信号が得られる。

【0037】従来の方法のマイケルソン干渉計でミラーを動かす方法のミラー速度に対応する速度量vは、v=c△φ_{..}/2πf₀となる。ここで例えばf₀=6GHz、△φ_{..}=π、τ=5μsとすると、v=5000m/sとなり、音速の15倍以上の超高速が実現できる。

【0038】次に、上記計測光生成部110により生成された計測光L_{MES}を測定部130に入射させる計測光注入部120は、上記計測光L_{MES}を非線形性を発生する程度まで増幅する光アンプ121を備える。そして、

この光アンプ121により増幅された計測光 L_{MES} がスーパーコンティニューム(SC)ファイバー122に入射される。このSCファイバー122は、内部で自己位相変調により計測光 L_{MES} すなわち光周波数コムのスペクトルを拡大する。これによって分解能が拡大する。従来同様な方法でスペクトル拡大を行った方法ではスペクトル幅は30THzに達しており、分解能を光速/(2n_{.....}スペクトル幅)とすると分解能は3μm以下となり、高分解能が得られることが分かる。上記SCファイバー122によりスペクトル拡大し、分解能が高められた計測光 L_{MES} は、その後の行程で自己位相変調が起こらないように、分散の大きい光ファイバー123を介してピーク強度を下げて、測定部130の光分離・合成器131に入射される。

【0039】上記測定部130の光分離・合成器131では、上記計測光生成部110により生成された計測光 L_{MES} を分歧させて一方を参照光 L_{REF} として光遅延路132に入射させ、他方を物体光 L_o として分散補償ファイバー133からスキャナ134を介して測定対象物OBに照射する。

【0040】上記光遅延路132は、分散補償ファイバー132A、遅延ファイバー132B、周波数シフタ132C及びミラー132Dからなる。この光遅延路132に入射された参照光 L_{REF} は、分散補償ファイバー132A、遅延ファイバー132B及び周波数シフタ132Cを通過してミラー132Dにより反射され、再び周波数シフタ132C、遅延ファイバー132B及び分散補償ファイバー132Aを介して上記光分離・合成器131に入射される。周波数シフタ132Cは、参照光 L_{REF} の周波数を往復で f_s だけシフトさせる。これによりドップラーシフトと等価の周波数シフトを参照光 L_{REF} に発生させる。このように、周波数シフタ132Cにより参照光 L_{REF} を f_s で変調しておくことにより、後述するように干渉信号 S_{DET} を交流信号として検出して位相情報を得ることができ、また、 f_s ±△fの周波数成分を識別することができる。

【0041】また、上記光分離・合成器131により分離された物体光 L_o は、分散補償ファイバー133からスキャナ134を介して測定対象物OBに照射された物体光 L_o は、スキャナ134及び分散補償ファイバー133を介して上記光分離・合成器131に入射される。

【0042】ここで、上記光遅延路132により参照光 L_{REF} に与えられる遅延時間は、上記光分離・合成器131により分離された物体光 L_o が測定対象物OBに反射されて当該光分離・合成器131に戻ってくるのに要する遅延時間に比べて τ だけ大きくなるように各ファイバの長さが設定されている。なお、分散補償ファイバー132A、133は、遅延ファイバー132Bの特性、あるいは信号処理系の構成により、

1:必要がない、

2:どちらかが必要、

3:両方が必要

となる場合があるが遅延ファイバー132Bの分散を補償するように分散と長さが設定され、干渉信号への影響を最小化にするようとする。

【0043】ここで、分散補償ファイバー132A、133は参照光 L_{REF} が経験する経路上の分散と、物体光 L_o が経験する経路上の分散が異なる場合にそれを等価にするは働きをする。例えば遅延ファイバー132Bが正の分散の場合では、例えば分散補償ファイバー132Aに負の分散の光ファイバーを用い、例えば高次の分散を分散補償ファイバー133を用いて補償する。これによって遅延ファイバー132Bによる分散の干渉信号に対する影響を低減し分解能の劣化を低減することが可能である。

【0044】例えば、遅延ファイバー132Bの長さ、屈折率、1次及び2次の群速度分散をそれぞれ L_c 、 n_c 、 k_{zc} 及び k_{zc} とし、また、分散補償ファイバー132Aの長さ、屈折率、1次及び2次の群速度分散をそれぞれ L_e 、 n_e 、 k_{ze} 及び k_{ze} とし、さらに、分散補償ファイバー133の長さ、屈折率、1次及び2次の群速度分散をそれぞれ L_o 、 n_o 、 k_{zo} 及び k_{zo} とし、遅延時間 τ を得る条件

$$\tau = 2(L_c n_c + L_o n_o - L_e n_e) / C$$

1次の群速度分散を補償する条件

$$0 = L_c k_{zc} + L_o k_{zo} - L_e k_{ze}$$

2次の群速度分散を補償する条件

$$0 = L_c k_{zc} + L_o k_{zo} - L_e k_{ze}$$

の3連の連立方程式をとき L_c 、 L_o 及び L_e をそれぞれ決定すれば良い。より高次の分散を補償することも可能である。またここでは光ファイバーを用いた例を示したが、ブラックリフレクター等を用いて分散を補償したり、プリズムペアなどを用いて空間的に分散を補償してもよい。

【0045】また、スキャナ134は、測定部130の光分離・合成器131から分散補償ファイバー133を介して物体光 L_o が入射される。このスキャナ134は、制御部150のスキャナ制御信号発生器152により与えられるスキャナ制御信号に従って測定対象物OBの表面で物体光 L_o を走査する。また、スキャナ134は、測定対象物OBの内部で反射した物体光 L_o が入射され、この物体光 L_o を分散補償ファイバー133を介して測定部130の光分離・合成器131に戻す。

【0046】上記スキャナ134は、例えば図6に示すように、上記分散補償ファイバー133からファイバコリメーター134Aを介して入射されレンズ134Dを介して測定対象物OBに照射する物体光 L_o について、第1のポリゴンミラー134Bにより図の紙面垂直方向のスキャンを行い、さらに、第2のポリゴンミラー134Cにより図の紙面と平行方向のスキャンを行う。また、

スキャナ134は、例えば図7に示すように、第1及び第2のポリゴンミラー134B, 134Cに代えて、音響光学素子134Fを用いて紙面と垂直方向及び平行方向のスキャンを行うようにしても良い。音響光学素子134Fを用いてスキャンする場合には、音響光学素子が光の周波数シフトを起こすことがある。その場合、スキャナ134による周波数シフトの効果を干渉信号から除く必要がある。例えば信号処理部140でスキャナ134による周波数シフトの効果は制御部150の信号より推定し、干渉信号より除去する。また、図7に示すように、別の周波数シフト補正用音響光学素子134Eで、ハードウェア上で周波数シフト補正用のAOMを用いて周波数シフトをなくしても良い。

【0047】以上説明では、深さ方向のスキャンを電気的に行っているが、物体の左右方向のスキャンは機械的、音響光学的に行っている。そのため、最終的なOCT装置の動作速度はこのスキャン速度で決まる。このようなスキャナ134を使用せずにOCT装置を構成することもできる。

【0048】すなわち、図8に示すように、計測光注入部120から光ファイバー123を介して測定部130の光分離・合成器131に入射される計測光 L_{MES} を上記光ファイバー123から空間伝搬させコリメータレンズ136Aにより平行光にして上記光分離・合成器131に入射させるようとする。ここで、計測光 L_{MES} を平行光にするコリメータレンズ136Aは適当な焦点距離を選び、物体光 L_{ob} を対象物OB全体に照射するようとする。一方参照光 L_{REF} は、同様に拡大した平行ビームとされ、コリメータレンズ136Bを介して光遅延路132に入射される。光分離・合成器131では、測定対象物OBから反射した物体光 L_{ob} のうち、同じ経路で戻ってきた光に対し参照光 L_{REF} と干渉するように設置したハーフミラーにより物体光 L_{ob} を参照光 L_{REF} と合成することにより干渉光 L_{DET} を生成する。そして、干渉光 L_{DET} を光検出器アレー135Aで検出する。

【0049】この時例えば点Pと点P'の経路で測定対象物OBに照射され、反射してきた物体光 L_{ob} は光検出器アレー135A上の違う点で参照光 L_{REF} とそれぞれ干渉し干渉光 L_{DET} を発生する。その光検出器アレー135A上の異なる2点では異なる光検出素子が存在し、それぞれ独立に干渉信号 S_{DET} を得ることができる。この光検出器アレー135Aのそれぞれの時間波形を、例えば図5の時刻Aから時刻Bまでの信号を同時に記録しておく。光検出器アレー135Aのそれぞれの光検出器では、測定対象物OBのそれぞれの点で反射された物体光 L_{ob} と参照光 L_{REF} との干渉光 L_{DET} を検出して、それぞれ独立に干渉信号 S_{DET} を得ることができ、これより測定対象物OBの内部情報が得られる。

【0050】したがってこの方法を用いると、対象にピームスキャンを行わなくても同時に測定対象物OBの2

次元方向の情報を得ることができる。また参照光 L_{REF} と物体光 L_{ob} に光周波数コムを用いることにより、高速に深さ方向の情報を得ることができる。したがって、機械的、音響光学的方法を一切用いずにさらに高速に対象の3次元情報を得ることができる。

【0051】例えば本光周波数コムを用いた場合で、本方法の1回の測定に要する時間は τ となる。したがって例えば $\tau = 5 \mu s$ として超高速測定が実現できる。

【0052】なお、図9に示すように、レンズ136C, 136D, 136E, 136Fを用いて測定対象物OB全体に物体光 L_{ob} を照射し、測定対象物OBの光学像を光検出器アレイ135A上に結像する構成にし、参照光 L_{REF} は平行ビームとして光検出器アレイ135A上に照射される構成にすると、測定対象物OBが大きく、遠くから光を照射しなければならない場合でも使用できる。

【0053】また、図4に示したOCT装置100において、信号処理部140には、上記光検出器135により検出された f_s で変調された参照光 L_{REF} と物体光 L_{ob} の干渉光 L_{DET} の検出出力として得られる干渉信号 S_{DET} が入力される。

【0054】この信号処理部140では、バンドバスフィルタ等により余計な雑音が除去され、增幅され、さらに f_s で変調された干渉信号 S_{DET} は例えばその後の信号処理のしやすいように周波数変換され、A/D変換されデジタル化される。この後、例えば以下の幾つかの信号処理を行う。

【0055】1. 例えば干渉信号 S_{DET} は長い遅延ファイバー132Bを通過し光ファイバーの分散の影響により信号が乱れ例えば分解能が低減している場合がある。その場合には、それを補正する処理を行う。デジタル化された信号は、例えば、予め遅延ファイバー132B等の分散の影響を光ファイバーの構造から計算しておき、信号を分散の影響の低減した信号に変換する計算を施す。又は予め金属ミラーなどの単純な反射測定を持つサンプルを用いて測定した結果から、信号を分散の影響の低減した信号に変換する計算を施す。

【0056】ここで、後者の例について説明する。光周波数コム発生器112で出力された計測光のm次のサイドバンドの複素振幅は

$$E_m(t) = E_0 \exp(i 2\pi \nu t + i 2\pi m f_0 t + i m \phi(t))$$

と表せられる。 i は素数である。分散補償ファイバ132A, 133の長さを0、遅延ファイバー132Bの長さを L とすると、群速度分散の2次以降の成分を無視すると先の光が光ファイバーを伝搬してきた後では

$$E_m \exp(i 2\pi \nu t + i 2\pi f_s t + i 2\pi m f_0 t - i k_{sc} L_c - i k_{sc} L_c (2\pi m f_0) - i k_{sc} L_c (2\pi m f_0)^2 / 2 + i m \phi(t - \tau))$$

と表せられる。したがって測定対象物OBがミラーであ

る場合m次のサイドバンド同士の干渉信号は

$$\operatorname{Re}[E_+ E_- \exp(i 2\pi f_s t - i k_{oc} L_c - i k_{ic} L_c (2\pi m f_s) - i k_{ic} L_c (2\pi m f_s)^2 / 2 + i m(\phi(t - \tau) - \phi(t)))]$$

となる。ここでtが0からtまでの時間の間 $\phi(t - \tau) - \phi(t) = -2\Delta\phi_{..}/\tau$ であり、

$$2\Delta\phi_{..}/\tau = 2\pi\Delta f$$

とおくと信号は

$$E_+ E_- \cos(2\pi(f_s - m\Delta f)t - k_{oc} L_c - k_{ic} L_c (2\pi m f_s) - k_{ic} L_c (2\pi m f_s)^2 / 2))$$

に比例する干渉信号となる。干渉信号をフーリエ変換することによって、信号成分のなかで、 $f_s - m\Delta f$ の周波数成分が光の $\nu + m f_s$ の周波数の位相成分を持っており、これを他の周波数成分と比較測定すれば1次の群速度分散 k_{zc} の値が、決定できる。したがって実際の測定から $\exp(i k_{zc} L_c (2\pi m f_s)^2 / 2))$ を干渉信号のフーリエ変換した値に乘すれば分散を補正した結果が得られる。

【0057】2. 例えば信号に含まれる高周波数成分(f_s から遠い成分。 m の絶対値が大きい成分。)を強調する処理を行い、分解能の向上した信号に変換する計算を施す。

【0058】3. 例えば信号の f_s で変調された干渉信号の周波数の変化量を信号から計算し、ドップラシフト量を求めることにより、対象物体の速度を得る。

【0059】4. 例えば干渉信号のスペクトル形状から波長毎の光の吸収量を測定し対象物体の屈折率等を求める。

【0060】5. 干渉信号のエンベロープを計算する。

【0061】以上的情報から、測定対象物の形状、速度分布、屈折率分布などを総合的に求めることができる。

【0062】ここでは干渉信号に含まれる分散の補償方法としてデジタル計算による手法を説明したが分散性の素子であるSAWデバイスなどのアナログ素子を用いても良い。

【0063】6. スキャナ134に図7のように音響光学素子134Fを用いてスキャンした場合では、音響光学素子134Fが光の周波数シフトを起こす場合がある。その場合、スキャナ134による周波数シフトの効果を干渉信号から除く必要がある。スキャナ134による周波数シフトの効果はシステムコントローラ151の信号より推定し、干渉信号より除去する。

【0064】さらに、図4に示したOCT装置100において、制御部150では、システムコントローラ151により上記信号処理部140により処理された信号と、上記計測光生成部110の位相制御信号発生器113C、上記測定部130のスキャナ134に与えるスキャナ制御信号を発生するスキャナ制御信号発生器152への制御信号を統合し、使用者の行った入力に応じて画像等として人の認知するデータ形式に変換して画像

出力装置153に信号をおく。例えば立体像、断面像を動画出力する。

【0065】ここで、図4に示したOCT装置100では、往復で τ 時間の遅延量を与える光遅延路132を用いたが、図10に示すように、片道で τ 時間の遅延量を与える光遅延路132を用いる構成とすることもできる。

【0066】図10に示すOCT装置200では、上述の光分離・合成器131に代えて光分離器231Aと光合成器231Bを設け、光分離器231Aにより計測光 L_{MES} を参照光 L_{REF} と物体光 L_{OB} に分離する。この光分離器231Aにより計測光 L_{MES} から分離された参照光 L_{REF} は、片道で τ 時間の遅延量を与える光遅延路232により τ 時間の遅延量が与えられて、アイソレータ232Dを介して光合成器231Bに入射される。この光遅延路232は、分散補償ファイバー232A、遅延ファイバー232B、周波数シフタ232C及びアイソレータ232Dにより構成されている。また、この光分離器231Aにより計測光 L_{MES} から分離された物体光 L_{OB} は、分散補償ファイバー233からアイソレータ234を介して光合成器231Bに入射され、この光合成器231Bを通過してスキャナ134に入射される。このOCT装置200において、他の構成要素は上述のOCT装置100と同じであるので、図10中に同一番号を付して示し、その詳細な説明を省略する。

【0067】以上、本発明について、任意の波長域における広いスペクトル幅を必要とする光計測システムに関するもののうちOCT装置に代表される空間的高分解能な測定を実現するための光計測システムに関して説明したが、本発明は、それ以外にも光周波数分解能が高い事が必要とされる測定装置にも応用される。

【0068】OCT装置は、空間的な分解能を測定する装置であるが、同時に対象の光の波長の違いによる応答特性、位相特性を測定できる。

【0069】例えばスキャナを用いないで測定対象物に光ファイバーで結合されているような光デバイス等の反射の波長依存特性の測定にも使用できる。

【0070】この場合光周波数コムの変調周波数に等しい高分解能の測定を短時間で実現できる。

【0071】例えまn次のサイドバンドが物体から反射し、複素振幅がサンプルの伝達関数 $A_n = A(\nu + m f_s)$ によって E_+ から $A_n E_-$ に変化する。これから得られる信号のm次の周波数成分に対応する部分は

$$\operatorname{Re}[A_n E_+ E_- \exp(i 2\pi f_s t - i k_{oc} L - i k_{ic} L (2\pi m f_s) - i k_{ic} L (2\pi m f_s)^2 / 2 + i m(\phi(t - \tau) - \phi(t)))]$$

となる。この成分は例えば $\phi(t - \tau) - \phi(t) = -2\Delta\phi_{..}/\tau$ で表せる場合、電気的な信号の $f_s - n\Delta f$ の周波数成分をフーリエ変換で求め、

E_+ 及び遅延ファイバーの分散等を予め測定しておくこ

とでA₁だけが決定できる。

【0072】また、例えば図11に示す構成により、フィルタ等の透過型デバイスの測定にも使用できる。

【0073】この図11に原理的な構成を示す光デバイスの透過測定装置20は、可干渉性を有する光L₁を出射する光源であるレーザ光源21と、このレーザ光源21からレーザ光L₁が入射される光周波数コム発生器22と、この光周波数コム発生器22に与える変調信号S_{M01}を発生する変調信号発生器23と、この変調信号発生器23により生成された計測光L_{MES}を参照光L_{REF}と物体光L_{OB}に分離する光分離器24と、この光分離器24により分離された参照光L_{REF}に所定時間t₀の遅延を与える光遅延路25と、上記光分離器24により分離された計測光L_{MES}が測定対象物OBを介して入射されるとともに、上記光遅延路25により所定時間t₀の遅延を与えた参照光L_{REF}が入射される光合成器26と、上記光合成器26により合成された参照光L_{REF}と物体光L_{OB}との干渉光L_{DET}の光強度の変化を検出する光検出器27とからなる。

【0074】このような構成の光デバイスの透過測定装置20では、測定対象物OBとしてフィルタ等の透過型デバイスの測定を行うことができ、光デバイス等の透過反射特性の測定を高分解能、高速に行うことができる。

【0075】さらに、図12に示す光デバイス測定装置300は、上述の図10に示すOCT装置200を変形して、光デバイスの反射測定と透過測定を行うようにしたもので、スキャナ134及びスキャナ制御信号発生器152が除かれ、第2の光分離器331A、第2の光合成器331B及び第2の光検出器335が設けられている。

【0076】この光デバイス測定装置300において、第2の光分離器331Aは、上記アイソレータ232Dを介して光合成器331Bに入射される参照光L_{REF}をさらに分岐して第2の参照光L_{REF2}を生成し、この第2の参照光L_{REF2}を第2の光合成器331Bに入射させる。この第2の光合成器331Bは、測定対象物OBを通過した物体光L_{OB}が入射され、上記第2の参照光L_{REF2}と物体光L_{OB}を合成して第2の干渉光L_{DET2}を生成し、この第2の干渉光L_{DET2}を第2の光検出器335に入射させる。この第2の光検出器335は、上記第2の干渉光L_{DET2}の光強度の変化を検出し、その検出出力として得られる透過測定用の第2の干渉信号S_{DET2}を信号処理部140に供給する。

【0077】この光デバイス測定装置300において、他の構成要素は上述のOCT装置200と同じであるので、図12中に同一番号を付して示し、その詳細な説明を省略する。

【0078】このような構成の光デバイス測定装置300では、透過反射特性の測定を同時に高分解能、高速に

行うことができる。また特定対象物OBの入出力を反転させた構成での測定を行えば、光デバイスのSバラメータの測定ができる。

【0079】

【発明の効果】以上詳細に説明したように、本発明によれば、光周波数コム発生手段において、第1の期間t₁には第1の周波数f₁で第2の期間t₂には第2の周波数f₁+△fの変調信号を所定の繰り返し周期で生成する変調信号生成手段からの変調信号により、光源から可干渉性を有する入射光を変調して、上記入射光の周波数を中心周波数とし、上記第1の期間t₁には第1の周波数f₁間隔毎に側帯波を有し、第2の期間t₂には第2の周波数f₁+△f間隔毎に側帯波を有する計測光を生成し、生成した計測光を光分離手段により参照光と物体光に分離して、光遅延手段により所定時間の遅延上記参照光に与え、上記物体光の測定対象物による反射光又は透過光と上記光遅延手段により所定時間の遅延が与えられた参照光とを光合成手段で合成することにより、上記参照光と物体光との干渉光を生成し、この干渉光の光強度の変化を検出手段で検出ことによって、1台の周波数コム発生器を用いた簡単な構成で短時間に且つ安定に空間的高分解能な測定を行うことができる。

【0080】さらに、上記光分離手段により分離された物体光の照射位置を測定対象物上で走査し、上記検出手段からの干渉検出結果に基づいて、測定対象物の形状情報を検出する形状検出手段で生成される複数の形状情報を用いて、画像生成手段により測定対象物の形状を示す画像を生成することによって、1台の周波数コム発生器を用いた簡単な構成で短時間に且つ安定に空間的高分解能な測定を行うOCT装置として機能する光計測システムを実現することができる。

【0081】

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明を適用したOCT装置の原理的な構成を示すブロック図である。

【図2】上記OCT装置における物体光と参照光の時間的な時間的变化を示す図である。

【図3】分解能を高めるようにしたOCT装置の原理的な構成を示すブロック図である。

【図4】本発明を適用したOCT装置の実施例の構成を示すブロック図である。

【図5】上記OCT装置の計測光生成部における変調信号発生部の動作を模式的に示す図である。

【図6】上記OCT装置の測定部におけるスキャナの構成例を模式的に示す図である。

【図7】上記スキャナの他の構成例を模式的に示す図である。

【図8】スキャナを使用せずにOCT装置を構成する場合の要部構成例を模式的に示す図である。

【図9】スキャナを使用せずにOCT装置を構成する場

合の他の要部構成例を模式的に示す図である。

【図10】本発明を適用したOCT装置の他の構成例を示すブロック図である。

【図11】本発明を適用した光デバイスの透過測定装置の原理的な構成を示すブロック図である。

【図12】本発明を適用した光デバイス測定装置の構成例を示すブロック図である。

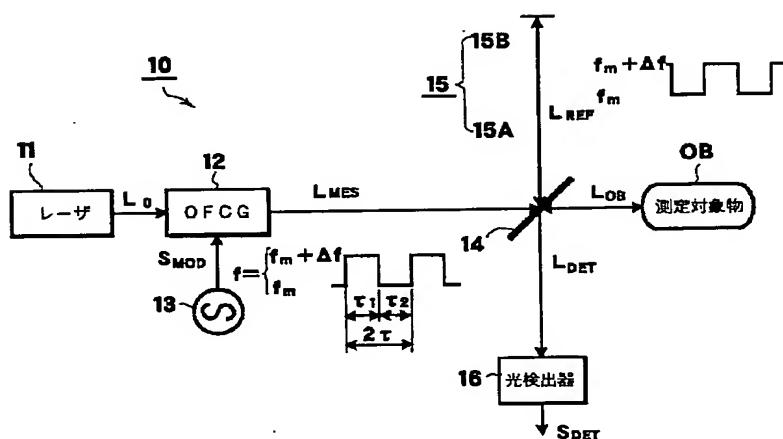
【図13】従来のOCT装置の構成を示すブロック図である。

【符号の説明】

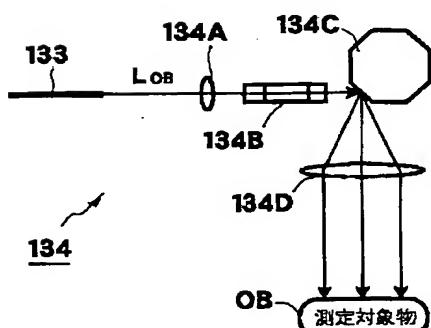
10 OCT装置、11 レーザ光源、12 光周波数コム発生器、13 変調信号発生器、14 光分離・合成器、15 光遅延路、16 光検出器、17 光アンプ、18 SCファイバー、OB 測定対象物、20 透過測定装置、21 レーザ光源、22 光周波数コム発生器、23 変調信号発生器、24 光分離器、25 光遅延路25、26 光合成器、27 光検出器、10*

* 0 OCT装置、110 計測光生成部、111 レーザ光源、112 光周波数コム発生器、113 変調信号発生部、113A マイクロ波発振器、113B 位相シフタ、113C 位相制御信号発生器、120 計測光注入部、121 光アンプ、122 SCファイバー、130 測定部、131 光分離・合成器、132 光遅延路、133 分散補償ファイバー、134 スキャナ、134A 光分離器、134B 光合成器、134C 光周波数コム発生器、134D 光検出器、134E 光周波数コム発生器、134F 光合成器、135 光検出器、136 光分離器、137 光合成器、138 光検出器、139 光周波数コム発生器、140 信号処理部、150 制御部、151 システムコントローラ、152 スキャナ制御信号発生器、153 画像出力装置、200 OCT装置、231A 光分離器、231B 光合成器、232 光遅延路、232D アイソレータ、232C 周波数シフタ、300 光デバイス測定装置、331A 第2の光分離器、331B 第2の光合成器、335 第2の光検出器

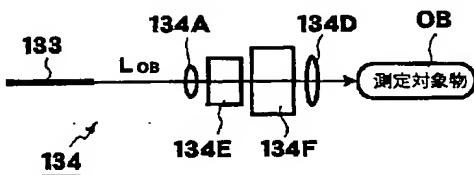
【図1】



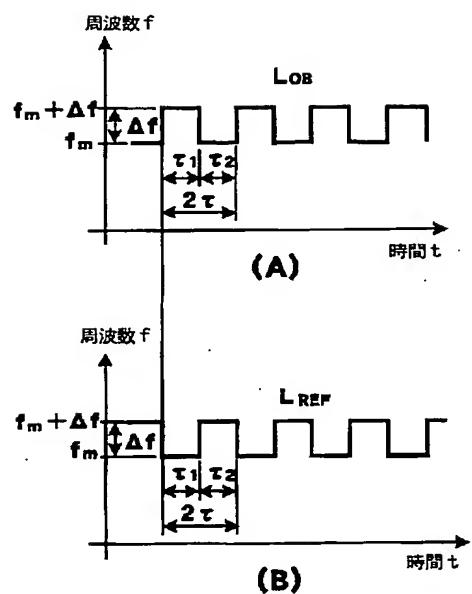
【図6】



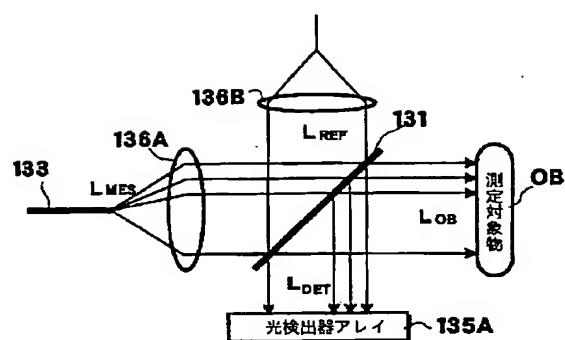
【図7】



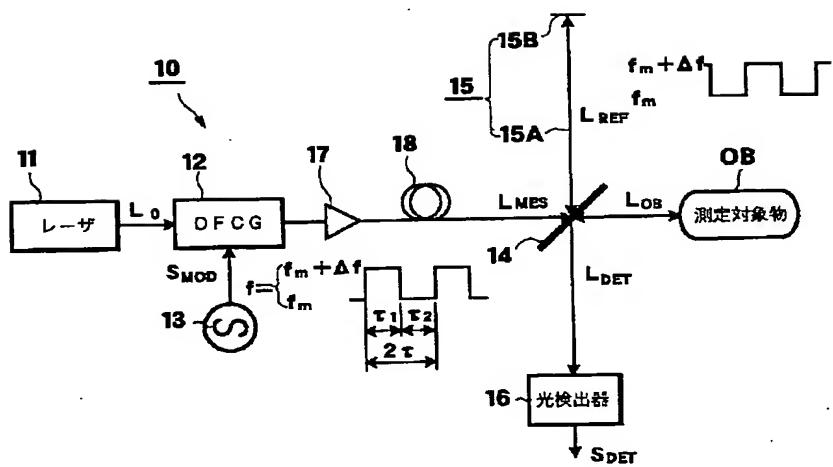
【図2】



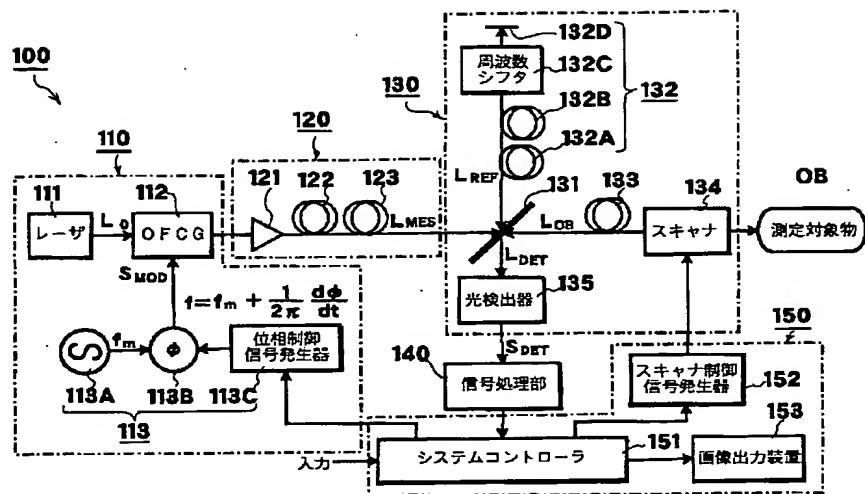
【図8】



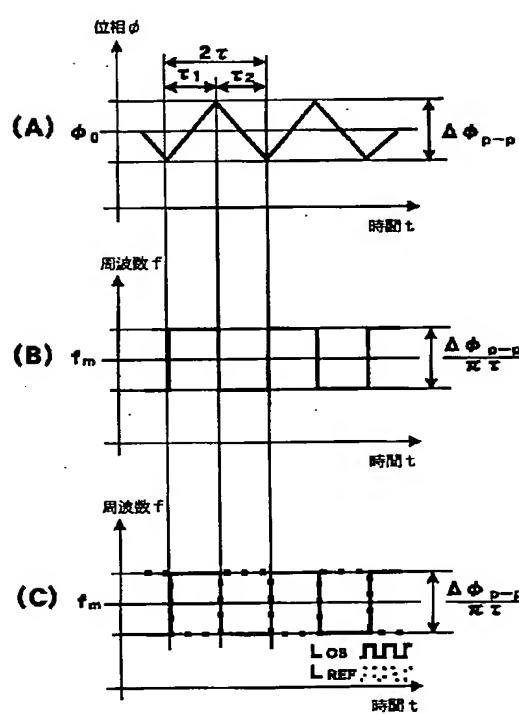
【図3】



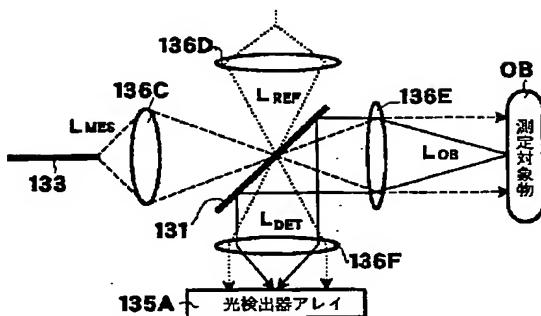
【図4】



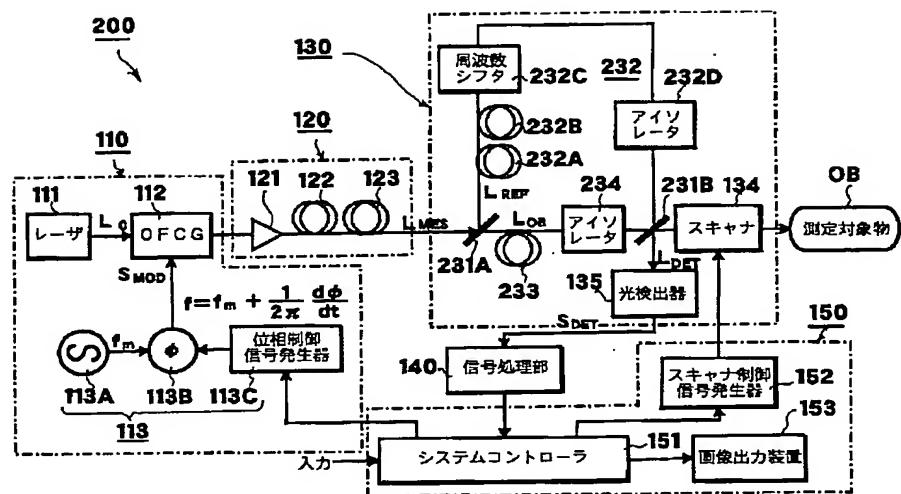
【図5】



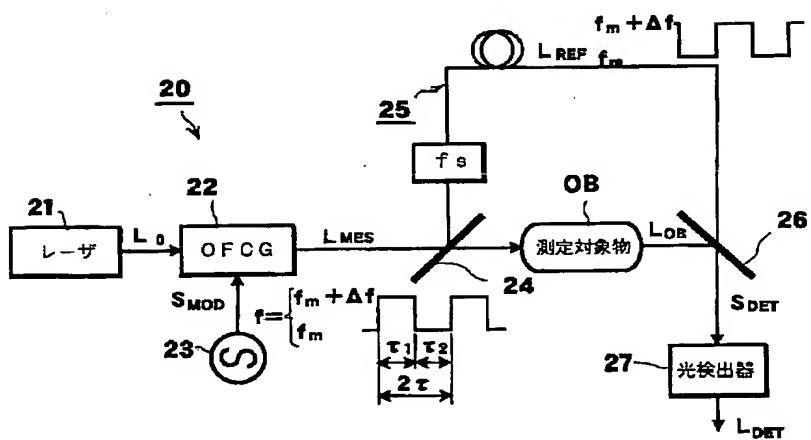
【図9】



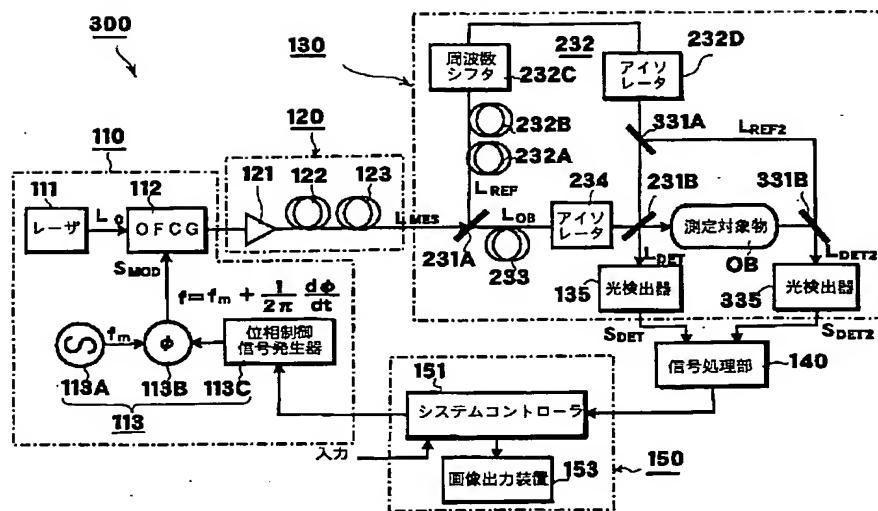
【図10】



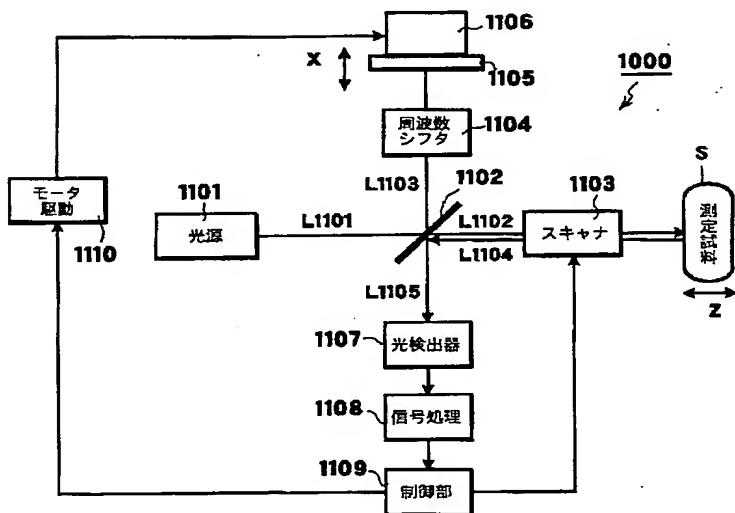
【図11】



【図12】



【図13】



フロントページの続き

F ターム(参考) 2F064 AA15 CC04 FF01 GG02 GG12
GG22 GG51 GG55 GG70 JJ03
JJ15
2F065 AA52 BB05 CC16 DD03 FF51
GG04 JJ01 LL02 LL12 LL53
LL57 MM16 MM26 NN08 QQ03
QQ16 QQ29
2G059 AA05 EE09 FF01 GG01 GG06
JJ11 JJ13 JJ17 JJ30 KK01
MM01 MM09